Mars 2016

Le stockage de l'énergie électrique

- Eléments de synthèse sur l'état de l'art et les perspectives – Jacques PIGNAULT

1. Préambule et contexte

La majorité des énergies primaires (gaz, pétrole ou charbon) se stocke facilement. Le stockage de l'électricité en grande quantité nécessite en revanche de la convertir au préalable en d'autres formes d'énergies intermédiaires et stockables (potentielle, cinétique, chimique ou thermique) et de la rétablir à l'utilisation.

On note par ailleurs que l'évolution du contexte énergétique mondial se caractérise notamment par les constatations majeures :

- L'utilisation de l'énergie électrique s'accroîtra fortement dans les prochaines décennies en raison de la simplicité et de la souplesse que ce vecteur d'énergie procure aux utilisateurs et afin de réduire globalement les utilisations d'énergies fossiles (pétrole et charbon principalement) ; elle offre par ailleurs de nombreuses possibilités de pilotage à distance.
- La part des énergies renouvelables dans la production d'énergie électrique augmentera fortement pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (principalement vapeur d'eau (H2O), dioxyde de carbone (CO2), méthane (CH4), protoxyde d'azote (ou N2O), ozone (O3) dont l'augmentation de concentration dans l'atmosphère terrestre est considérée comme étant à l'origine de l'essentiel du réchauffement climatique). Parmi ces énergies renouvelables, l'éolien et le solaire sont intermittents, l'hydraulique, la géothermie et la biomasse peuvent assurer une production à la demande dans la plupart des cas.
- L'intensité des pointes de demande en électricité devrait augmenter fortement notamment du fait de l'accroissement incessant de la population terrestre ainsi que des besoins individuels et collectifs en hausse, même si de gros efforts de sensibilisation sont faits pour éviter le gaspillage.

L'équilibre permanent entre l'offre et la demande, qui conditionne la stabilité des réseaux de distribution électrique, rend indispensable l'intégration dans les dispositifs de production et de distribution de stockages jouant le rôle de tampons entre une production intermittente pour la part assurée par l'éolien et le solaire et une demande évolutive dont les fluctuations ne sont en aucun cas en phase avec les périodes de production des énergies renouvelables.

2. Enjeux et objectifs

Savoir et pouvoir stocker l'énergie électrique pour assurer l'équilibre entre production et consommation aux différents niveaux du réseau et dans des conditions acceptables sur les plans techniques, économiques et médiatiques constitue un prérequis incontournable au développement massif et durable des énergies renouvelables intermittentes.

Toutes les parties prenantes sont concernées, et les solutions mises en place se devront de faciliter l'atteinte des différents enjeux et objectifs visés par chacune d'entre elles. Principalement :

Pour les gestionnaires de réseaux :

- Utiliser au mieux les infrastructures existantes et reporter au plus tard les investissements nécessaires au renforcement des réseaux,
- Intégrer la production d'énergie intermittente tout en assurant les utilisateurs d'une fourniture stable d'électricité,
- Sécuriser les équilibres entre offre et demande en optimisant les capacités de pointe et d'effacement.

Pour les producteurs disposant d'installations intermittentes :

- Optimiser le dimensionnement des installations en couplant production intermittente et stockage d'énergie,
- Utiliser le stockage comme outil d'arbitrage sur les marchés de l'énergie et pour se prémunir contre les risques économiques des moyens et longs termes.

Pour les consommateurs industriels

- Sécuriser leur approvisionnement en électricité en termes quantitatifs et qualitatifs,
- Intégrer le stockage de l'énergie électrique au cœur de leurs activités et de leurs procédés pour générer des revenus d'effacement.

Pour les territoires

- Intégrer le stockage d'électricité comme une composante d'une stratégie de développement des énergies renouvelables,
- Sécuriser l'approvisionnement énergétique du territoire et diminuer sa dépendance.

D'un point de vue global, le stockage de l'énergie électrique contribuera ainsi notablement à la satisfaction des trois enjeux suivants :

- Gain environnemental lié aux possibilités de déploiement à grande échelle d'énergies intermittentes,
- Capacité d'apporter et d'adapter au cas par cas des réponses centralisées ou décentralisées pour des contraintes locales ou globales,
- Indépendance vis à vis des ressources fossiles, tant sur le plan économique que politique et environnemental.

3. Les solutions de stockage de l'électricité

Elles peuvent être regroupées en quatre catégories selon la nature des procédés mis en œuvre :

- Mécanique (barrages hydroélectriques, Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP), Stockage d'Energie par Air Comprimé (CAES), volants d'inertie),
- Electrochimique (batteries, vecteur hydrogène),
- Electromagnétique (supercondensateurs, solutions à base de matériaux supraconducteurs (Superconductor Magnetic Energy Storage (SMES)),
- Thermique (chaleur latente ou sensible).

Les solutions « mécaniques »

Les stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) ont un très bon rendement global (rapport de 70 à 80 % entre l'électricité produite et l'électricité consommée) Elles sont aujourd'hui les solutions majoritairement mises en œuvre (99 % des capacités monde, soit 120 GW ; en France 5 GW).

Le principe de fonctionnement d'une STEP est simple. Elle est composée de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. En aval, un système de turbinage et de pompage permet de générer ou de stocker de l'électricité en fonction de l'équilibre offre demande et des demandes du réseau en services systèmes (notamment la régulation de fréquence).

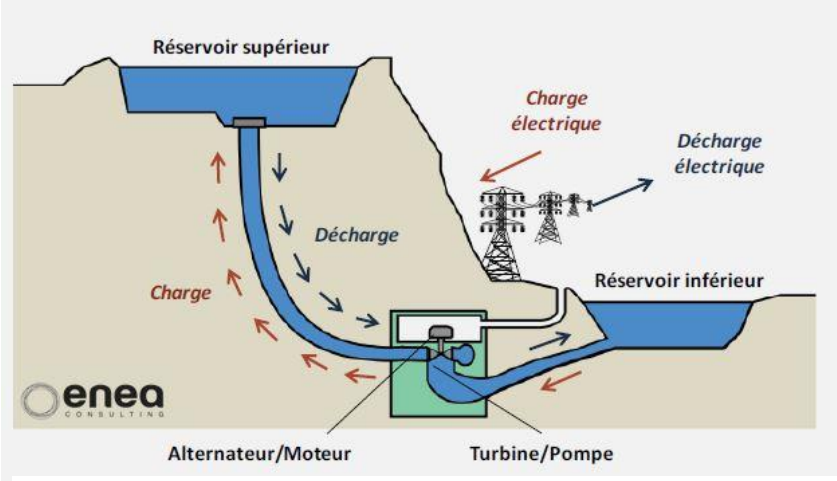
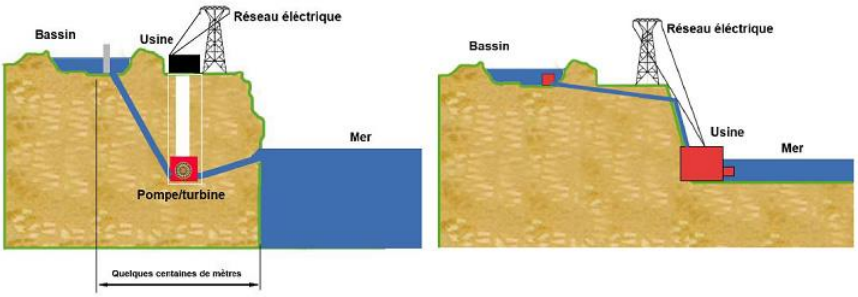


Schéma de principe d'une STEP à conduit souterrain

Les STEP peuvent également être installées en façade maritime, avec la mer comme retenue inférieure et une retenue amont au sommet d'une falaise ou constituée par une digue. Il existe aujourd'hui une STEP marine à Okinawa au Japon et, en France, EDF SEI a des projets à La Réunion, la Guadeloupe et en Martinique.

Schéma de principe d'une STEP marine
– Source EDF-SEI -



Le point majeur pénalisant pour les STEP est le besoin de sites compatibles qui freine leur acceptabilité environnementale et sociétale.

Les stockages d'Energie par Air Comprimé (CAES) sont en fort développement. Leur efficacité énergétique est assez faible (40 % environ).

Leur fonctionnement consiste, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) grâce à un compresseur, et au moment de la pointe de consommation, à libérer cet air comprimé pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité.

Les deux problèmes que pose leur développement sont :

- L'échauffement du gaz lors de la compression. Des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur (stockage adiabatique)
- Le nombre de sites disponibles (cavernes, anciennes mines) pour lesquels de bonnes performances d'étanchéité sont nécessaires, en compétition avec les stockages de gaz naturels déjà exploités.

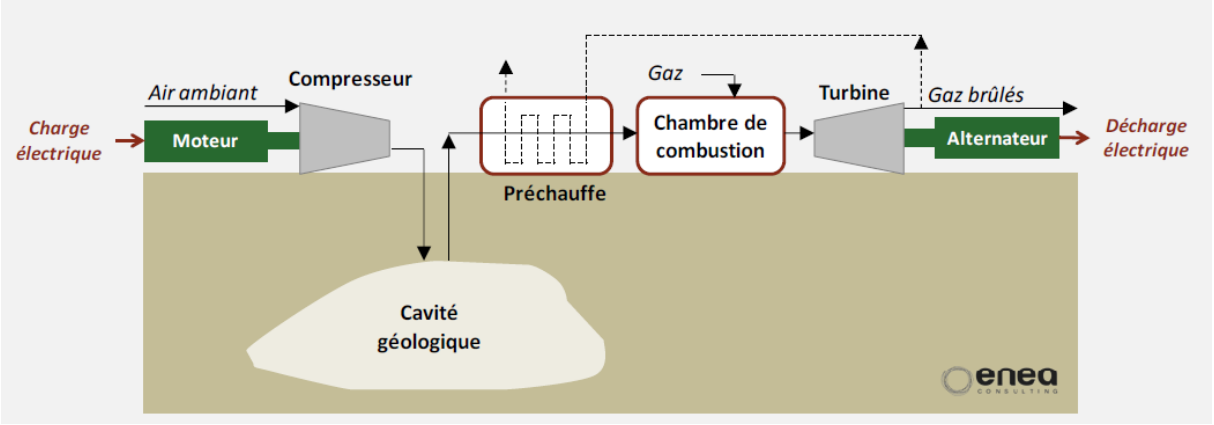


Schéma de principe d'une installation CAES souterraine (source Enea consulting)

Les volants d'inertie permettent de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique. Un volant d'inertie est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique.

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente. L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

Les systèmes de stockage par volant d'inertie ont une très forte réactivité et une grande longévité. En effet, ce système peut absorber de très fortes variations de puissance sur de très grands nombres de cycles. Cependant, les volants d'inertie subissent des pertes de charge en raison de phénomènes d'autodécharge et ne permettent pas d'obtenir une durée d'autonomie importante. Ces systèmes sont donc adaptés pour des applications de régulation, d'optimisation énergétique d'un système et d'amélioration de qualité (microcoupures par exemple). Utilisés pour ces applications, les volants d'inerties ont de très bons rendements de cycles charge-décharge (80 à 85 % pour le Voss - Volant de stockage solaire - développé par la société française Energiestro par exemple).

Les solutions électrochimiques

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium (zebra).

	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Ni-Zn	Zebra	LMP	Li-ion	Li-Po	LiFePo4	Li-air
Wh/kg	40	60	90	80	120	110	150	190	110	1000
Durée de vie (cycles)	500	2000	1500	nc	nc	1800	1000	2000	2000	nc

Tableau comparatif des différentes technologies de batteries électrochimiques (source : Avem)

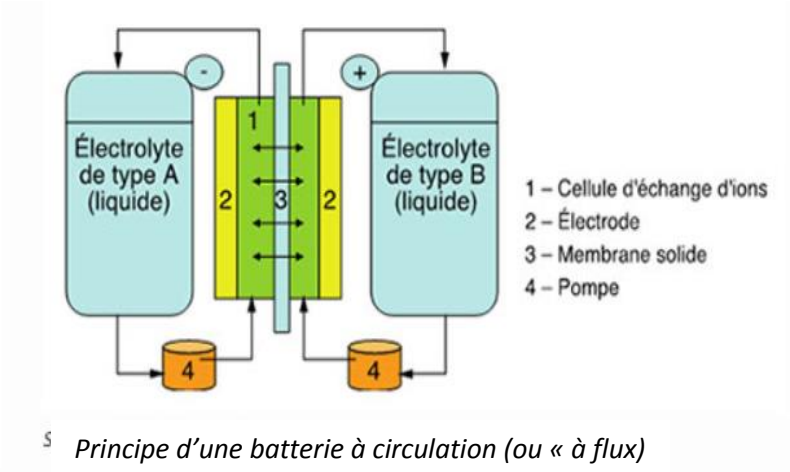
NB : Le CEA met aujourd'hui au point des batteries où le sodium remplacerait le lithium, avec un coût nettement plus faible et une efficacité comparable

L'empilement est ensuite relié à un système d'électronique de puissance qui, lors de la décharge, convertit le courant continu des batteries en courant alternatif à la tension, la fréquence et la puissance voulues. Ce système est aussi utilisé dans le sens inverse pour recharger les batteries.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours). La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies. Les principaux avantages des batteries sont leur flexibilité de dimensionnement et leur réactivité. Les batteries électrochimiques sont souvent destinées à des applications portables. De puissance relativement faible, elles présentent néanmoins une grande capacité de stockage pour des durées de décharge élevées (jusqu'à plusieurs heures) avec un taux de rendement de 70 à 80%.

Les batteries à circulation (appelées batteries « redox-flow ») se composent de deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques, séparés par une membrane échangeuse de protons, circulant à travers des électrodes. L'échange de charges permet de produire ou d'absorber l'électricité.

Les couples d'ions métalliques zinc/brome, polybromure/polysulfure de sodium et vanadium/vanadium sont les plus étudiés aujourd'hui. La puissance produite ou absorbée est dépendante du dimensionnement de la membrane d'échange et des électrodes, tandis que l'énergie stockée est dépendante du volume des électrolytes.



Principe d'une batterie à circulation (ou « à flux)
– Source IFPEN d'après diverses sources -

Les systèmes disponibles aujourd'hui ont des puissances de l'ordre de 10 à 500 kW et des énergies stockées de l'ordre de 100 à 5000 kWh (entre 3 et 10 heures à pleine puissance).

Le vecteur hydrogène. Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur

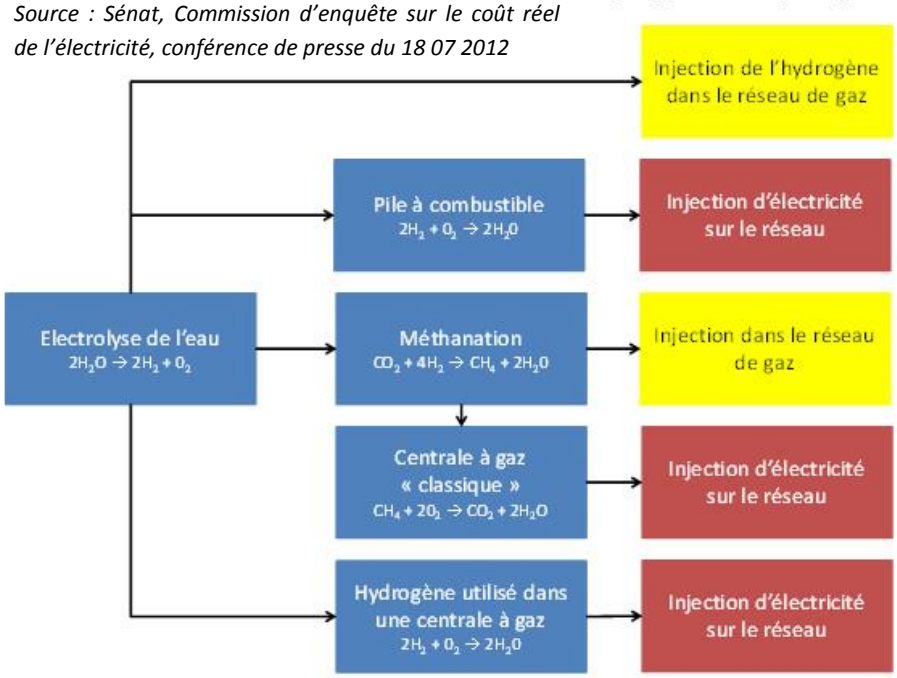
utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène. Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- Le premier consiste à alimenter une pile à combustible dans une installation fixe ou mobile (véhicule) ;
- Le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz existant mais surtout être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- Le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.

Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène

Source : Sénat, Commission d'enquête sur le coût réel de l'électricité, conférence de presse du 18 07 2012



L'intérêt des stockages d'énergie grâce à l'hydrogène réside :

- dans leur grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;
- et dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

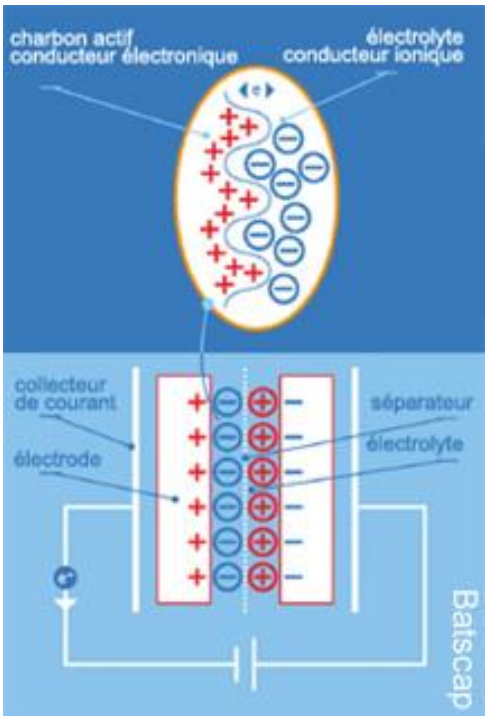
Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système. À l'heure actuelle, plusieurs projets portent sur des systèmes de stockage d'hydrogène de grande capacité (réservoirs de stockage tampon ou réservoirs souterrains) entre sources d'énergies intermittentes et réseaux électriques.

Electrolyseur et pile à combustible dans le bâtiment de conversion énergétique - Source AREVA -

La plateforme MYRTE (photographie ci-avant) récemment installée en Corse illustre ce principe : elle est constituée d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560kW reliée à un électrolyseur qui convertit l'électricité en hydrogène pendant les heures creuses ; cette énergie est ensuite restituée via une pile à combustible qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité pendant les heures de forte consommation.

Les solutions électromagnétiques

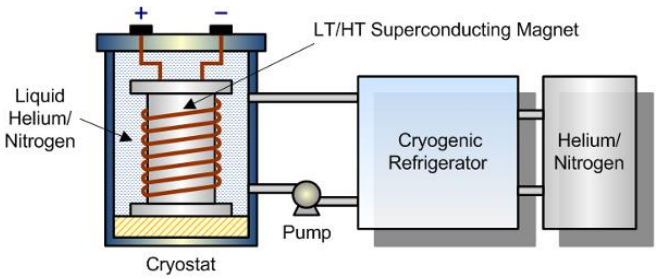
Le principe des supercondensateurs repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction.



L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts.

Il faut souligner qu'à la différence d'un condensateur, un supercondensateur est doté d'une double couche électrique sur chaque interface électrode-électrolyte. La présence de cette double couche électrique modifie les caractéristiques et les comportements d'un supercondensateur vis-à-vis d'un condensateur. Dans un supercondensateur, les électrodes sont conçues pour développer la plus grande surface possible, grâce à un support en charbon microporeux ou plus récemment grâce à du graphène. C'est ainsi qu'un supercondensateur peut stocker 1 million de fois plus d'énergie électrique qu'un condensateur et peut conserver sa charge bien plus longtemps.

Une autre piste est celle des solutions à base de matériaux supraconducteurs (ou SMES pour « Superconductor Magnetic Energy Storage »).



Ce système est destiné au stockage de grandes quantités d'énergies, dont 50 % peuvent être restituées en moins d'une seconde. Un tel dispositif bénéficie d'un rendement qui se situe entre 75 % et 90 %. Les applications SMES ont par contre des coûts très élevés, sont encore limitées et doivent démontrer leur faisabilité à grande échelle, du fait de la nécessité de maintenir une température très basse. Elles sont principalement développées aux Etats-Unis.

Les solutions thermiques

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW, les réseaux de chaleur, et le marché résidentiel par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS). Il faut souligner que le stockage de chaleur concerne principalement le chauffage (ou la climatisation) de bâtiments qui représente près de 50 % de la consommation énergétique en Europe.

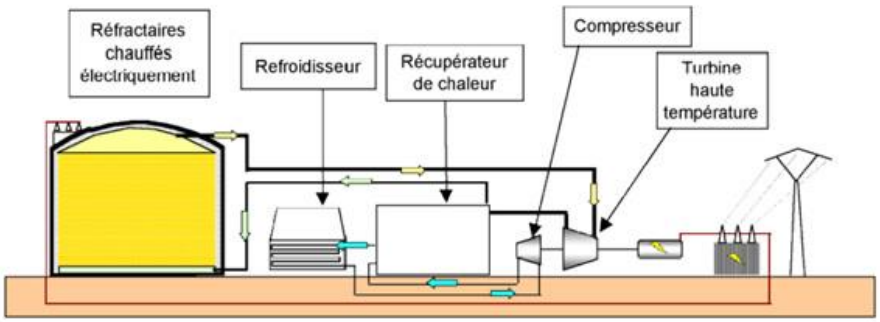
Il y a deux facteurs clefs pour les matériaux étudiés :

- L'inertie thermique (sables, bétons, céramiques, …)
- La capacité à supporter de très hautes températures.

Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants.

Schéma d'une installation de stockage thermique

Source : Bernard Multon et Jacques Ruer « Stocker l'électricité : oui c'est indispensable et c'est possible »

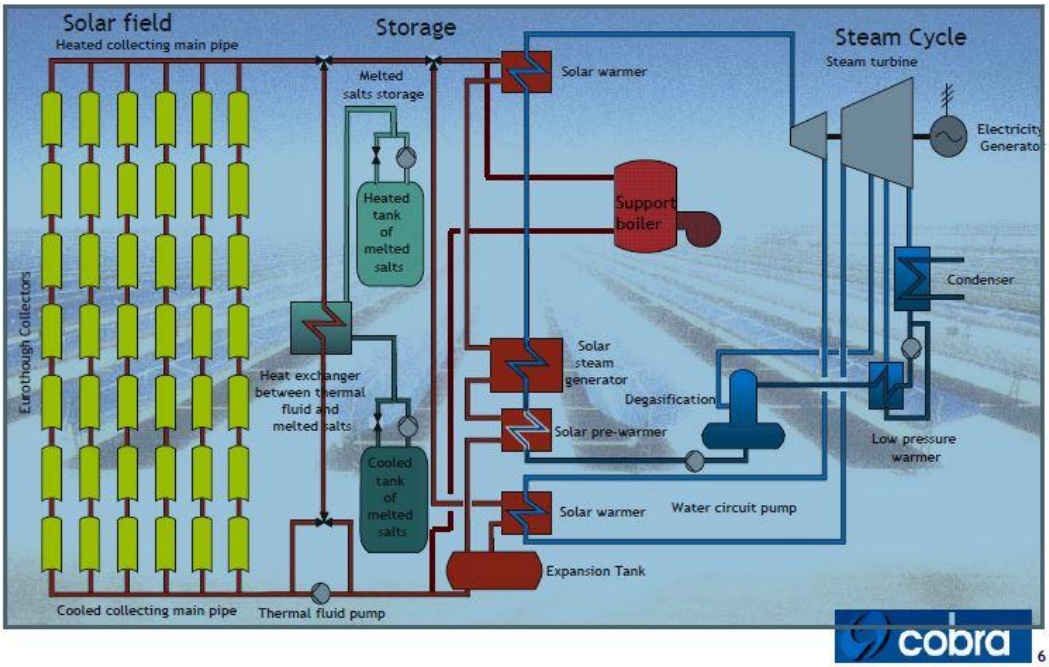


Le stockage de chaleur dans les ballons d'eau chaude sanitaire mobilise aujourd'hui un parc de plusieurs millions d'installations, ce qui représente un appel de puissance de plusieurs gigawatts au maximum. Cet appel de puissance est prédictible et commandable, ce qui permet de décaler cet appel de puissance de manière programmée.

Une autre voie en cours d'étude est le stockage de chaleur lié aux centrales solaires thermodynamiques, qui consiste à concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur permettant de chauffer à haute température un fluide caloporteur qui, directement ou après stockage, va activer un générateur d'électricité via une turbine. Différents types type de fluide caloporteur sont étudiés mais aujourd'hui, c'est un sel fondu qui paraît le plus prometteur. C'est ainsi qu'en 2008 la centrale solaire Andasol 1 était la plus puissante centrale solaire thermodynamique d'Europe avec 50 MWe. Deux extensions identiques (Andasol 2 et Andasol 3) ont été réalisées et mises en service.

Les centrales solaires Andasol 1,2 et 3, situées en Andalousie sont chacune équipées d'une unité de stockage thermique qui absorbe une partie de la chaleur produite durant la journée afin de la restituer la nuit ou durant les périodes nuageuses, doublant ainsi pratiquement le nombre d'heures opérationnelles dans le cours d'une année. Le réservoir thermique plein représente une réserve de 1010 MWh de chaleur, ce qui est suffisant pour actionner la turbine durant 7,5 heures à pleine charge (50 MW élec par centrale) lorsqu'il pleut ou après le coucher du soleil. Les capacités thermiques consistent en 2 réservoirs de 36 mètres de diamètre sur 14 m de haut, stockant chacun 28500 tonnes de sels à 60% de nitrate de sodium et de 40% de nitrate potassium (point de fusion 221°C) travaillant entre 291 et 384°C. Les réservoirs travaillent en push-pull, l'un en remplissage (chauffage) l'autre en vidange (refroidissement). Ils prélèvent ou restituent l'énergie au fluide caloporteur par des échangeurs.

Schéma de principe d'une centrale solaire Andasol (1, 2 ou 3) développée par le groupe COBRA (Source :Groupe ACS - Actividades de Construccion y Servicios)



Besoins en R&D

De façon générale, les technologies actuelles ont toutes besoin d'améliorations significatives pour développer un marché à un taux de rentabilité compétitif. Les principaux sujets de recherche portent sur les procédés de fabrication et de mise en œuvre, les matériaux (contenant et contenu), le rendement global, l'autodécharge et les pertes, la durée de vie et le vieillissement, la sécurité, la localisation et le lien avec le réseau (approche système).

Ces besoins portent principalement sur :

- Pour les STEP, l'optimisation des pompes-turbines et des infrastructures (limitation de la corrosion par l'eau salée, évaluation des sites et des impacts sur l'environnement),
- Pour les CAES, l'amélioration des systèmes de compression sous hautes pressions et hautes températures, ainsi que l'amélioration de la tenue mécanique et de la conductivité des matériaux pour les échangeurs,
- Pour les procédés chimiques, des matériaux et des composés chimiques plus performants, notamment en liaison avec la thermique, ainsi que des procédés de fabrication, de mise en œuvre et de gestion de nature à augmenter la durée de vie, l'autonomie et le recyclage du système,
- Pour les stockages de chaleur, des matériaux permettant d'augmenter les durées de vie et d'améliorer les rendements. Diminuer les volumes d'encombrement est également recherché,
- Pour le stockage d'hydrogène, l'élaboration de nouveaux concepts et de nouveaux matériaux offrant une sécurité maximale à un coût acceptable.

4. Comparatifs et éléments de choix

Les différentes solutions de stockage ont des caractéristiques bien spécifiques qui les rendent plus complémentaires que concurrentes. De plus, leurs développements industriels ne sont pas dans des niveaux de maturité comparables.

Comparatifs vis-à-vis de critères de type utilisateur

Parmi les critères permettant de les spécifier, on peut citer :

- Des critères techniques :
    - La puissance disponible et la capacité énergétique. La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière ;
    - Le temps de réaction est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système ;
    - L'efficacité, définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée (en MWh_{OUT}/MWh_{IN}) ;

- La durée de vie, qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries ;
- Pour d'autres usages, d'autres critères sont à prendre en compte, comme la densité énergétique (en MWh/kg ou en MWh/m^3) pour la mobilité par exemple.

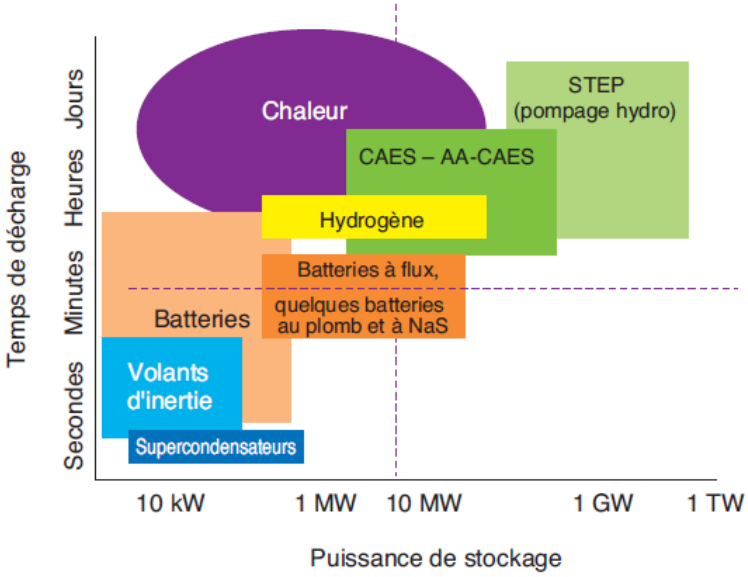
- Des critères économiques et sociétaux:
  - Les coûts d'investissement et d'exploitation ;
  - Les performances et contraintes environnementales ;
  - La localisation géographique et les pertes induites par le transport.

Le tableau qui suit présente, en termes d'ordres de grandeur, des éléments de comparaison accessibles pour un maître d'ouvrage et un futur exploitant.

Comparaison des différentes technologies de stockage de l'électricité (Données DGEC et EPRI)

Technologie	Capacité	Puissance	Délais de réaction	Coûts des investissements (€/kW)	Durée de vie (nbre de cycles)	Usage	Commentaires
STEP	1 à 10 GWh	0,1 à 2 GW	10 min	600 à 1500	11000	Réseau	99 % des capacités de stockage d'électricité installées. Besoin de sites compatibles
CAES	10 MWh à 10 GWh	15 à 200 MW	1 min	400 à 1200	1000	Réseau	2ème génération et technologie adiabatique en cours de développement. Besoins de sites compatibles
Hydrogène	10 kWh à 10 GWh	1 kW à 1 GW	100 ms	3000 à 5000	25 ans	Industrie Particuliers	Flexibilité d'usage de l'hydrogène produit Possibilité de valoriser la chaleur produite Découplage de la puissance de l'énergie stockée
Batteries	1 kWh à 10 MW h	0,01 à 10 MW	1 ms	300 à 3000	500 à 4000	Industrie Particuliers	Forte réactivité. Les batteries à circulation nécessitent un maintien en circulation
Volants d'inertie	0,5 à 10 kWh	2 à 40 MW	5 ms		>10000	Réseau	Très forte réactivité Faible capacité en énergie
Super condensateurs	3 kWh	Tension : 2,5 V	3 s		>10000	Réseau industrie	Très forte réactivité
SMES	0,3 à 30 kWh		8 ms		>10000	Réseau industrie	

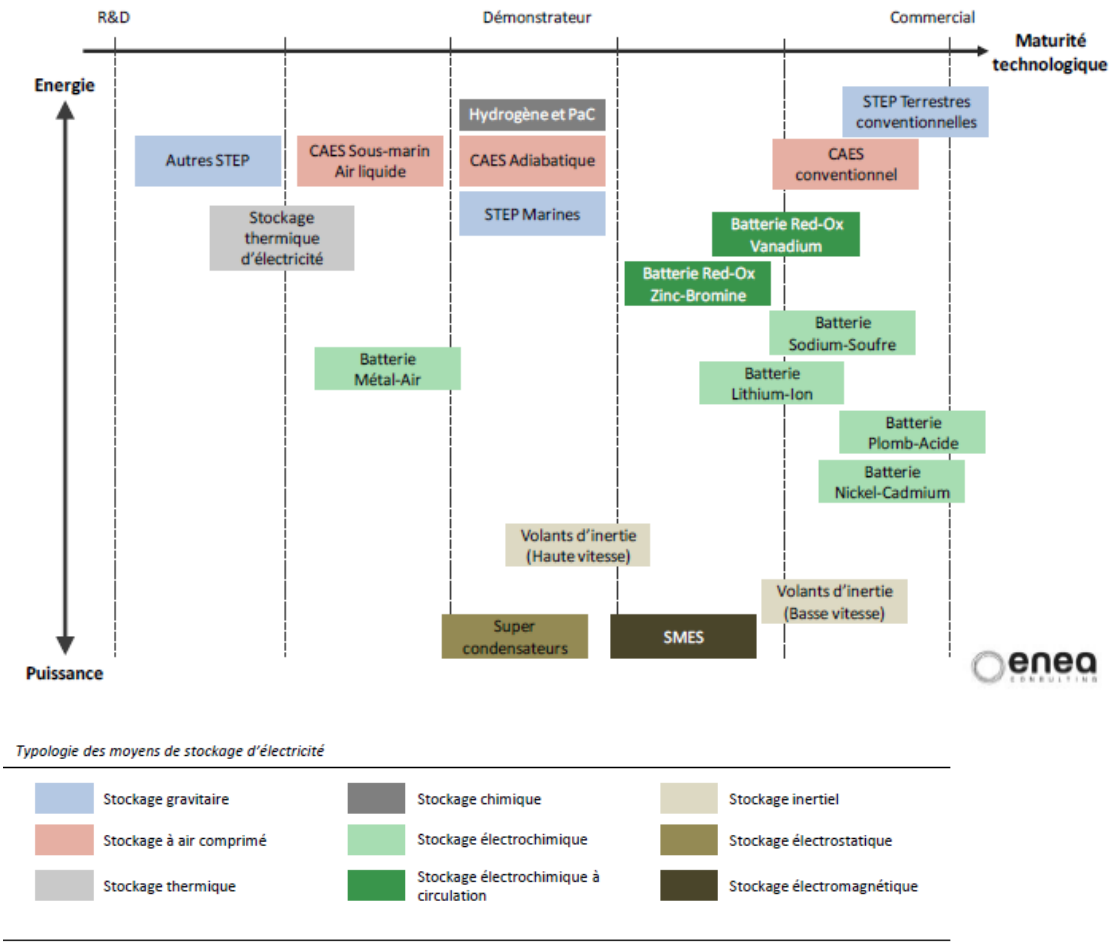
D'un point de vue synthétique, le graphique ci-après (source : IFPEN) positionne les technologies selon leurs temps de décharge et puissance typiques.



Il faut en dernier lieu souligner que les niveaux de maturité technologique des solutions de stockage de l'électricité sont très variables. De nombreux démonstrateurs sont en cours d'expérimentation. D'importants efforts de recherche et de développement mobilisent aussi bien les instituts publics et privés que les équipementiers fournisseurs de solutions et les opérateurs de réseaux électriques ou de chaleur.

Comparatifs vis-à-vis du critère maturité

Le degré de maturité de diverses technologies de stockage est présenté ci-après. Nombre d'entre elles sont encore au stade de R&D. Les STEP sortent du lot en réunissant à ce jour 99% de la puissance de stockage installée dans le monde.



Il faut enfin souligner qu'il n'existe pas à ce jour d'encadrement règlementaire spécifique au stockage de l'énergie électrique. Il n'est pas fait de distinction, sur le plan régulatoire de l'électricité, entre un moyen de stockage, un moyen de production ou un site de consommation.
La loi NOME, du 7 décembre 2010 pourrait ouvrir une opportunité réglementaire au développement du marché des stockages d'électricité.

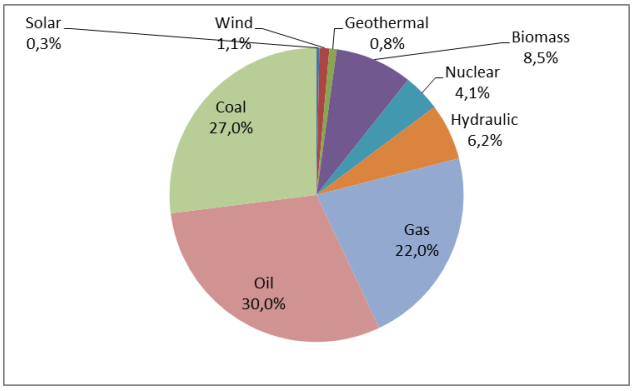
En effet, dans son article 6, la loi NOME prévoit la mise en place d'une obligation de capacité pour les producteurs d'électricité, leur imposant de justifier d'une capacité physique de production égale à la puissance nécessaire à la fourniture de leurs clients. Cette obligation devrait également s'assortir de la naissance d'un marché de capacité, ceci à horizon 2017.

Une nouvelle valeur serait ainsi attribuée à la puissance rendue disponible par le stockage d'énergie, en procurant à ses détenteurs des certificats de capacité à valoriser sur un marché. Les modalités exactes ne sont pas encore connues, mais c'est une source de gains qui viendrait s'ajouter aux revenus liés à la vente d'énergie. Un scénario de double valorisation de la capacité de stockage (puissance de charge et de décharge) aurait même un effet catalyseur pour la filière.

5. Perspectives

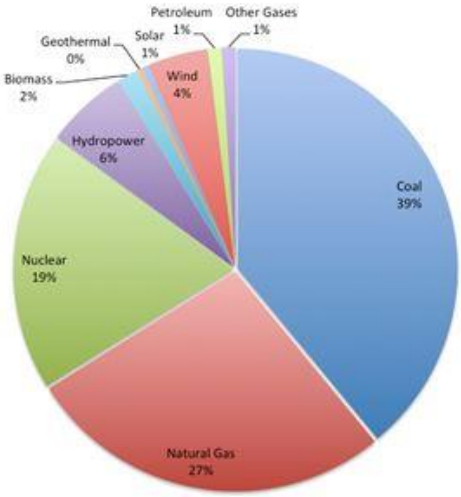
La consommation mondiale d'énergies primaires pour tous les usages (industrie, transports, habitats, …) en 2014 montre que les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) représentent 80 % de l'énergie globale utilisée.

Une part importante de ces énergies fossiles est utilisée pour produire de l'électricité : au niveau mondial, 30 % pour produire 70 % de l'électricité ; les 30 % restant sont le produit des filières nucléaire (19 %), hydraulique (6 %), éolienne (4 %) et solaire (1 %).



Consommation mondiale d'énergies primaires en 2014 (Source : BP Statistical Review)

Au niveau mondial, l'électricité utilisée provient ainsi très majoritairement des combustibles primaires fossiles (pétrole, charbon et gaz) qui existent à l'état naturel au même titre que les autres combustibles primaires (biomasse, nucléaire, soleil, vent, géothermie) mais qui ont l'inconvénient de conduire à des dégagements importants de CO2.



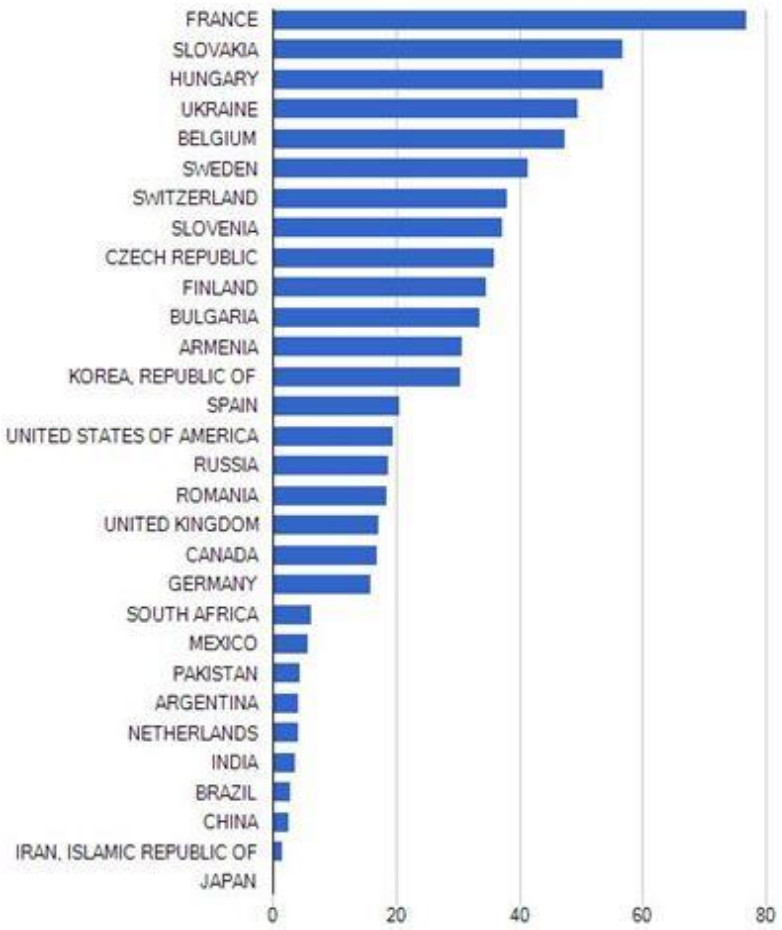
Production d'électricité mondiale par sources d'énergies primaires en 2014 (Source : EIA)

L'électricité ne peut donc être globalement qualifiée aujourd'hui d'énergie décarbonée. L'énergie décarbonée ne peut provenir que d'une énergie primaire dite « sans CO2 », telles que le nucléaire, la biomasse, la géothermie, le soleil, le vent, ces deux dernières ne pouvant hélas produire que de façon intermittente.

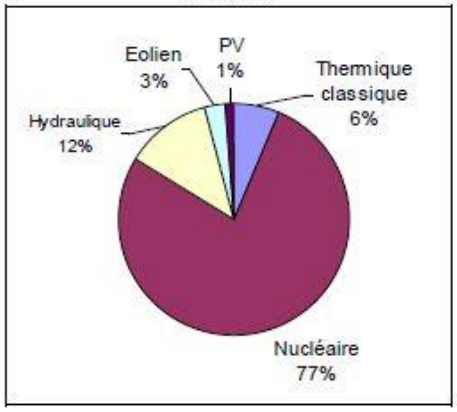
La transition énergétique « raisonnée » passera donc par une production d'électricité « permanente », le nucléaire (et l'hydraulique lorsque la géographie le permet), associée à une production d'électricité « intermittente », soit le solaire et l'éolien.

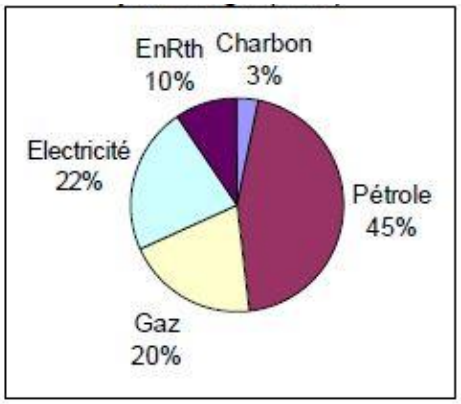
Les positionnements des différents pays vis-à-vis de la caractéristique « décarbonée » de l'électricité sont très divers, selon l'importance des sites aménageables en production d'électricité hydraulique (l'électricité d'origine hydraulique représente 99 % de l'électricité produite en Norvège et 84 % de l'électricité produite au Brésil) et de leur parc nucléaire en opération. Le diagramme présenté ci-après montre la disparité des parts nationales d'électricité d'origine nucléaire. La position de la France est privilégiée puisque aujourd'hui seulement 6 % de son électricité est d'origine fossile. En revanche les énergies fossiles représentent 68 % de la consommation totale d'énergie finale.

Part d'électricité d'origine nucléaire dans les productions d'électricité nationales en 2014 (Source AIEA)



Production d'électricité par filières en France, en 2014 (Source Agence du Développement Durable)





Consommation totale d'énergie finale par énergie en France, en 2014 (Source Agence du Développement Durable)

Nota : EnRth signifie Energies Renouvelables Thermiques

Dans tous les cas de figure, il est bien clair que le développement des techniques de stockage de l'électricité et de leur intégration dans les réseaux est une condition *sine qua non* du succès de la

transition énergique. Les solutions de stockage devront être diversifiées pour répondre aux différents besoins d'équilibre offre-demande, tels que durée, vitesse de réponse, quantité stockée, localisation.

Cet énorme besoin de stockage, à court et moyen termes apparaît de plus en plus comme concrètement urgent et important à satisfaire pour tenir les objectifs de réchauffement climatiques qui sont, quant à eux, intellectuellement admis par la grande majorité des terriens.

Bien sûr, une revue des solutions possibles montre qu'il n'existe pas de solution à bas coût. Un effort financier important est et sera nécessaire. Mais l'enjeu est de taille !

A titre d'illustration, la voiture électrique ou la voiture à hydrogène, magnifiques avancées innovantes vers plus de pureté dans nos environnements, ne pourront vraiment avoir une efficacité globale que lorsque l'électricité « décarbonée » aura détrôné l'électricité «carbonée » actuelle. A défaut, nous roulerons toujours en consommant du pétrole et du charbon ! Et le bilan carbone, localement amélioré, sera toujours perfidement le même globalement !

Selon le Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE, avis du 30 juin 2015), c'est autour de 2030 que l'intégration du stockage autour des énergies renouvelables intermittentes prendra toute son importance. S'agissant d'un horizon assez court dans l'univers de l'énergie, le CESE considère qu'il est urgent de créer la dynamique indispensable pour s'assurer que les technologies envisageables et les investissements nécessaires seront au rendez-vous aussi bien pour soutenir les réseaux que pour répondre à des besoins décentralisés.

Cela donne tout son sens aux ambitions et aux travaux de la COP 21. Dans tous les scénarios et quelles que soient ses conclusions, il faudra bien stocker l'énergie renouvelable car seul le nucléaire peut produire de l'électricité décarbonée en phase avec la demande.

Le parc français est déjà très flexible :

- 13 GW hydro, 4,3 GW STEP,
- 13 à 20 TWh pour l'eau chaude sanitaire, pouvant facilement être déplacées,
- Forte interconnexion avec les pays frontaliers.

En l'état, pour ce qui le concerne, les opportunités visées à horizon 2030 pour des stockages supplémentaires sont les suivantes (source : Artelys) :

- 1 à 2 GW de STEP en métropole,
- 200 à 400 MW de stockage électrique distribué dans les DOM-TOM,
- 5 à 10 GWhth de capacité de stockage de chaleur,
- 600 MW de stockage dédié à la réserve tournante (sous contrainte de faisabilité technique).

6. Conclusion

En définitive, si le stockage d'énergie constitue un levier technique incontournable pour intégrer les moyens de production intermittents et les nouveaux usages, il reste à consolider un certain nombre d'éléments d'ordre technique, réglementaire et surtout économique. On peut notamment souligner que les énergies intermittentes ne pouvant être utilisables (techniquement et économiquement) que couplées à des stockages d'électricité, il eut mieux valu ne les autoriser et les promouvoir

qu'associées dès l'origine à des solutions de stockage. Le débat sur la transition énergétique, en particulier sur la limitation de la production d'électricité d'origine nucléaire aurait gagné en clarté et en pertinence.

Selon les choix politiques et réglementaires de développement du stockage de grande capacité et/ou du stockage diffus émergeront des business modèles multiples et complexes, déclinés pour chaque acteur du marché.

C'est ainsi par exemple que la résonnance technique, politique, médiatique et individuelle d'offres telles que celle que développe Tesla pour les installations domestiques de stockage en batteries pour optimiser l'exploitation d'une production locale d'énergie intermittente peut infléchir sensiblement les arbitrages qui ne manqueront pas d'être faits dans les années qui viennent pour stocker l'électricité.

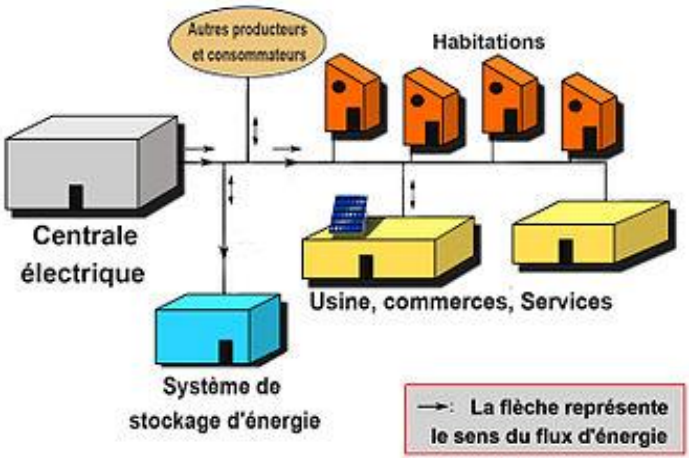


Schéma simplifié et de principe d'un système intégré de stockage dans un réseau électrique, de type « Grid energy storage (source Wilkipedia)

7. Principaux sites de références et sources

- IFP Energies Nouvelles (IFPEN)
- Smartgrids Commission de Régulation de l'Energie (CRE)
- Enea Consulting
- US Energy Information Administration (EIA)
- Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC)
- Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA)
- Wikipedia, Capenergies
- Conseil Economique, Social et Environnemental (avis de Juin 2015 notamment)
- SFEN (supports du colloque « Nucléaire et Environnement » de novembre 2015
- Nuclear for Climate)
- BP Statistical Review
- Groupe Argumentaire Sur le Nucléaire (GASN)
- Observatoire de l'Innovation dans l'Energie (OIE, notamment Conférence internationale sur le stockage de l'énergie 2015)
- EDF, AREVA, ERDF, Sénat
- Agence du Développement Durable